

# LA MISIÓN DE OPORTUNIDAD SMOS DE LA SERIE EARTH EXPLORER.

## RADIOMETRÍA POR SÍNTESIS DE APERTURA PARA LA MEDIDA DE LA HUMEDAD DEL SUELO Y LA SALINIDAD DEL OCÉANO



A. Camps, I. Corbella, J. Bará, F. Torres, N. Duffo, M. Vall-llossera

*camps@tsc.upc.es, corbella@tsc.upc.es, bara@tsc.upc.es, xtorres@tsc.upc.es,  
duffo@tsc.upc.es, merce@tsc.upc.es*

*Universitat Politècnica de Catalunya, Campus Nord, D3, tel (34) 934016849,*

### ABSTRACT

Desde mediados de los años 80, diversas Agencias Espaciales han prestado una atención a los llamados radiómetros interferométricos por síntesis de apertura. Estos instrumentos ofrecen por primera vez un salto cuantitativo importante en resolución espacial como para permitir monitorizar la superficie terrestre a frecuencias bajas de microondas (banda L). En esta banda de frecuencias (1.4 GHz) existe la máxima sensibilidad de la temperatura de brillo tanto a la humedad del terreno, como a la salinidad del océano.

En los radiómetros clásicos, la resolución espacial viene dada por el ancho de haz de la antena que, al ser escaneada, forma la imagen de temperatura de brillo. Por ello, para alcanzar la resolución espacial deseada (30-50 km como máximo, 10-20 km ideal) desde un satélite en órbita baja, las antenas requeridas tienen unas dimensiones inaceptablemente grandes: entre 10 y 20 metros de diámetro.

Durante los años 90, la Agencia Europea del Espacio (ESA) llevó a cabo una serie de estudios tecnológicos con vistas a desarrollar un radiómetro por síntesis de apertura bidimensional en banda L. A este proyecto se le llamó **MIRAS** (Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis). En Noviembre de 1998, la misión **SMOS** (Soil Moisture and Ocean Salinity) basada en el concepto derivado de los estudios del proyecto MIRAS, fue propuesta como respuesta a un anuncio de «Misiones de Oportunidad Earth Explorer» lanzado por la ESA [1]. En Mayo de 1999, después de un proceso de selección de 27 propuestas, la ESA aprobó la misión SMOS en segundo lugar para una fase A extendida.

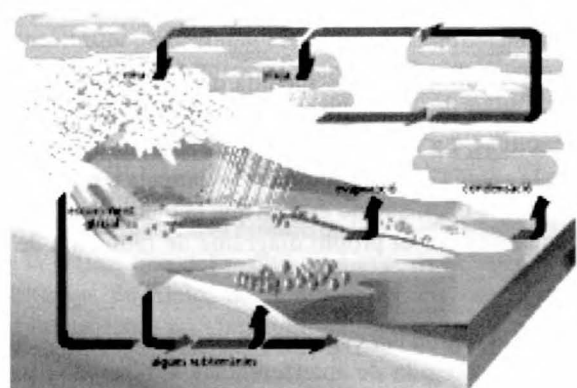
Este artículo describe brevemente la motivación de esta misión, los principios de funcionamiento de dicho instrumento y las actividades en las que ha participado y participa un grupo de profesores del

Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions, de la Universitat Politècnica de Catalunya.

### 1. INTRODUCCIÓN

El progreso en la predicción del tiempo, monitorización del clima y predicción de desastres naturales pasa por una mejor cuantificación de la humedad del suelo (Soil Moisture, SM) y de la Salinidad del Mar (Sea Salinity, SS). Recientemente, los resultados de varios grupos de trabajo concluyen que nuevos progresos dependen en estos momentos de la disponibilidad de información global y periódica de la SM y de la SS.

Hoy en día es bien conocido que sobre la tierra, los flujos de agua y energía en la interfaz entre el suelo y la atmósfera dependen fuertemente de la SM. La evaporación, la infiltración y la escorrentía están regulados por la SM en la superficie, mientras que en la zona de las raíces regula la cantidad de agua que es capaz de absorber la vegetación. Por lo tanto, la variación espacio-temporal de la SM aparece como una variable clave en el ciclo hidrológico, y en consecuencia, en los modelos climáticos, de predicción del tiempo y de monitorización de la vegetación.



*Figura 1. El ciclo hidrológico.*



En el océano, la SS juega un papel importante, por ejemplo, en la zona subpolar del Atlántico Norte, donde intrusiones de agua de mar de baja salinidad influyen la circulación termohalina profunda y el transporte de calor meridional. Las variaciones de la salinidad también afectan la dinámica superficial en los océanos tropicales, donde la lluvia modifica la densidad de la capa superficial y los flujos de calor en la interfaz entre la superficie del océano y la atmósfera. Las variaciones espacial y temporal (anual e interanual) de la SS son, pues, un indicador del ciclo del agua e imponen las condiciones de contorno en los modelos que rigen el acoplamiento entre el océano y la atmósfera.

Aunque tanto la SM como la SS se utilizan habitualmente en los modelos atmosféricos, oceanográficos e hidrológicos, hoy en día no existe la capacidad de medir directa y globalmente estas dos variables claves. Como la realización de medidas in situ dista mucho de ser global, la única solución es la de una misión espacial dedicada.

## 2. RADIOMETRÍA DE MICROONDAS: CONCEPTOS BÁSICOS

La radiometría de microondas es la técnica más eficiente y precisa conocida para monitorizar la SM y la SS. Radiometría es la rama de la teledetección consistente en la medida de la radiación espontánea emitida por los cuerpos, en el caso que nos ocupa, en la banda de microondas. Esta medida viene caracterizada por la temperatura de brillo ( $T_B$ ), proporcional a la temperatura física ( $T_{ph}$ ) y a un parámetro llamado emisividad que depende de las características eléctricas de la superficie en cuestión, su rugosidad, la polarización  $p$  y los ángulos de observación en elevación ( $\theta$ ) y azimuth ( $\phi$ ).

$$T_{B,p}(\theta, \phi, f) = \epsilon_p(\theta, \phi, f) T_{ph} \quad (1)$$

Habitualmente la medida de  $T_B$  se realiza con receptores muy sensibles conectados a antenas muy directivas. La medida de la potencia de ruido captada por la antena es proporcional a la llamada temperatura de antena ( $T_A$ ), que no es más que la media de  $T_B(\theta, \phi)$  ponderada por el propio diagrama de radiación de la antena.

La región del espectro en banda L (1.400-1.427 MHz), protegida de interferencias y reservada para observación pasiva, ofrece una posibilidad única de medir estos dos parámetros, que no pueden ser detectados en ninguna otra banda de frecuencias.

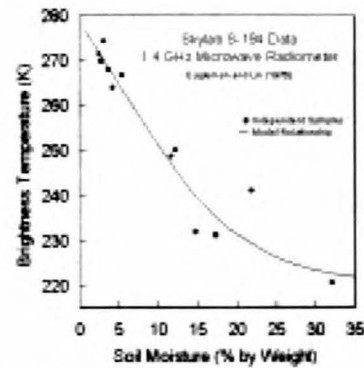


Figura 2. a) Temperatura de brillo del suelo en función de la humedad del terreno.

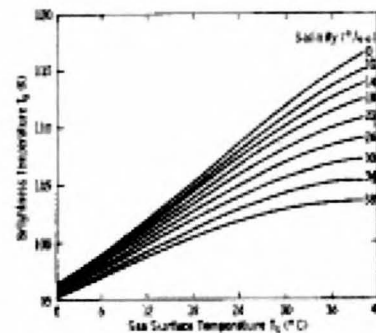
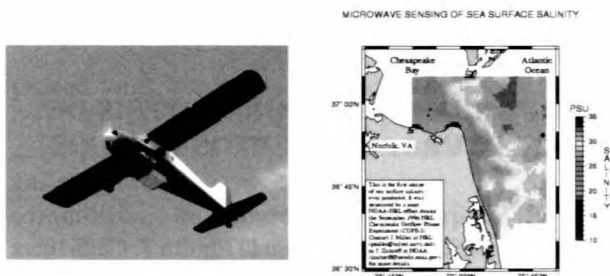


Figura 2.b) Temperatura de brillo del agua en función de la temperatura física y de la salinidad. [2].

Uno de los mayores inconvenientes de la radiometría en banda L es que requiere enormes antenas para conseguir una resolución espacial aceptable, lo que supone un reto tecnológico muy importante en una misión espacial. Por ello, aunque este concepto fue demostrado por algunos experimentos pioneros en banda L llevados a cabo en el SKYLAB en los 70, ninguna misión espacial dedicada fue lanzada posteriormente: para conseguir una resolución espacial aceptable ( $\leq 50$ -60 km) se requerían antenas de tamaños prohibitivos (radio del reflector  $\geq 4$  m). Las investigaciones que siguieron en años posteriores se centraron pues en medidas terrestres o en radiómetros embarcados en avión, con resultados muy esperanzadores.

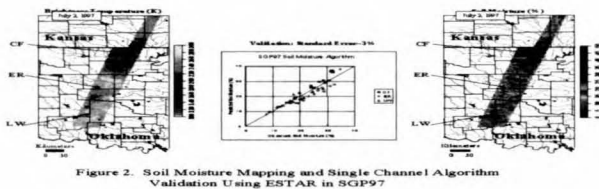
La figura 3 muestra un mapa de SS y otro de SM obtenidos con los radiómetros en banda L SLFMR y ESTAR, respectivamente.

Gracias al desarrollo reciente de la llamada radiometría interferométrica por síntesis de apertura es posible conseguir estas prestaciones. La radiometría por síntesis de apertura está inspirada en el concepto de radioastronomía mediante interferometría de gran línea de base VLA (Figura 4).



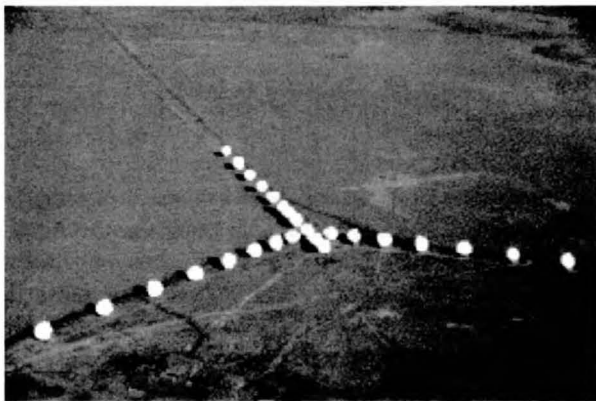
**Figura 3.a)** El sensor SLFMR en los bajos de un avión DeHavilland Beaver

**Figura 3.b)** Mapa de salinidad en la bahía de Chesapeake obtenida con el sensor SLFMR [3]



**Figura 3.c)** Mapa de temperatura de brillo obtenida con el sensor ESTAR y mapa de humedad del terreno asociado [4].

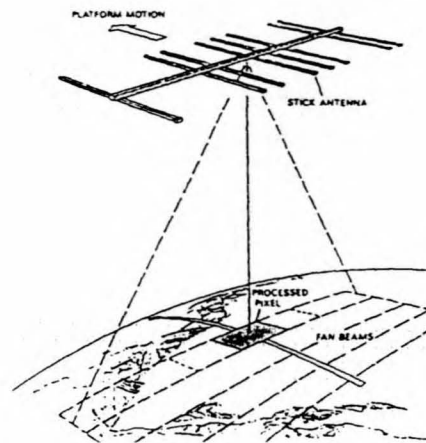
La idea consiste en colocar en una estructura desplegable un conjunto de pequeños receptores, para después reconstruir la temperatura de brillo de la escena con una resolución comparable a la de una antena de radio cuyo tamaño fuese igual a la separación entre los receptores más alejados.



**Figura 4.** El Very Large Array (VLA) en Socorro, Nuevo México, USA.

Esta idea fue propuesta inicialmente por D. M. LeVine (NASA Goddard) et al., en los años 80 con el proyecto ESTAR (Electrically Steered Thinned Array Radiometer) y validado con un sistema aerotransportado desarrollado en la Universidad de Massachusetts en Amherst. Este sistema obtenía reso-

lución angular en una dirección mediante apertura real (antenas tipo bastón) y en la otra dirección mediante síntesis de apertura (Figura 5).

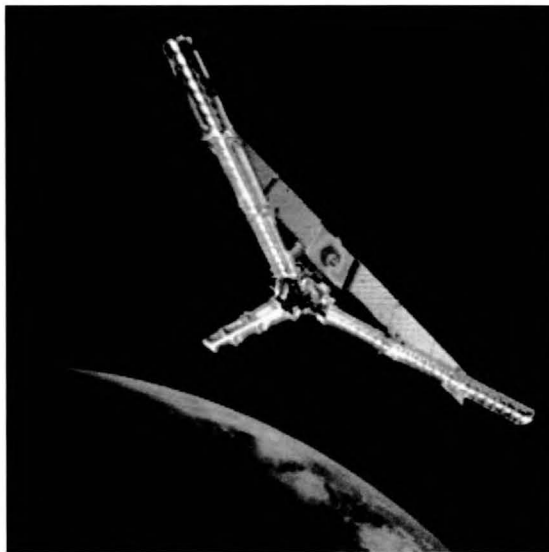


**Figura 5.** El radiómetro por síntesis de apertura ESTAR (Electrical Steered Thinned Array Radiometer)

En Europa, un concepto mejorado del mismo fue estudiado por la Agencia Europea del Espacio. Es el proyecto MIRAS (Figura 6). MIRAS capitaliza parte del diseño de ESTAR, y a la vez representa mejoras substanciales. Al realizar síntesis de apertura bidimensional se puede medir TB en un margen de ángulos de incidencia mayores y en las dos polarizaciones (vertical y horizontal, o paralela y perpendicular al plano de incidencia). Además, el instrumento mide una escena completa en sólo 0.3 s, lo que corresponde a un emborronamiento («blurring») de la imagen de 2.2 km, menos de un 10% del tamaño de píxel. A medida que el satélite avanza, cada píxel se ve bajo diferentes ángulos de incidencia en cada una de las imágenes, lo que permite recuperar parámetros de la superficie con mucha mayor precisión [5].

Con esta perspectiva la misión SMOS fue propuesta a la Agencia Europea del Espacio [2]. Es una misión con unos objetivos científicos amplios y ambiciosos, a la vez que puede considerarse como un demostrador para allanar el camino de futuros sistemas que utilicen estas mismas técnicas. Se prevé que la misión SMOS genere además información significativa del contenido de agua de la vegetación, lo que puede ser muy útil en la estimación de producción de las cosechas. Finalmente, se espera poder realizar un progreso importante en el estudio de la criosfera, mejorando la estimación del manto de nieve, de la estructura multicapa de hielo, del hielo en el mar etc. Estos parámetros son igualmente importantes en el estudio del cambio climático.

La misión SMOS pretende obtener, sobre el océano abierto, mapas globales de salinidad con una precisión mejor que 0.1 PSU (aproximadamente 1



**Figura 6.** Geometría de observación del instrumento MIRAS (misión SMOS). Nótese el parecido con el VLA (Figura 4), aunque en el VLA las antenas están espaciadas logarítmicamente y en MIRAS están equiespaciadas  $0.89 \lambda$ .

PSU = 1 parte por mil) cada varios días, con una resolución espacial de 200 km; y sobre la tierra mapas globales de humedad del suelo con una precisión de  $0.035 \text{ m}^3/\text{m}^3$  cada 3 días, con una resolución espacial mejor que 60 km, así como contenido de agua en la vegetación con una precisión de  $0.2 \text{ kg m}^{-2}$ . La plataforma estará en órbita heliosíncrona (6 a.m.) a una altura de 757 km. La Tabla 1 resume las características principales.

**Tabla 1** Principales parámetros de la misión.

Parámetro	Valor
Tamaño*	~ 4.5 m cada brazo (Y)
Peso	175 kg
Consumo	220 W
Swath	620 km
Resolución espacial	30 – 90 km
Sensibilidad radiométrica	0.8 – 2.2 K
Precisión radiométrica	< 3 K
Fecha de lanzamiento prevista	2005

\*Nótese que, aunque el tamaño del brazo sea comparable al del radio del reflector requerido para alcanzar la misma resolución espacial, la masa y volumen del radiómetro interferométrico son mucho menores.

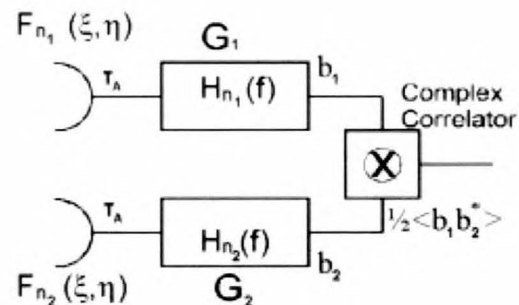
SMOS es una misión ambiciosa, basada en un concepto de instrumento novedoso que ha requerido y requerirá en los próximos años de una cantidad de trabajo muy considerable tanto en el diseño de la misión y como del propio instrumento. El presente

*La misión SMOS pretende obtener, sobre el océano abierto, mapas globales de salinidad con una precisión mejor que 0.1 PSU*

artículo pretende describir los conceptos básicos del instrumento y de la misión.

### 3. RADIOMETRÍA POR SÍNTESIS DE APERTURA: CONCEPTOS BÁSICOS

El esquema básico de un radiómetro interferométrico se presenta en la Figura 7. Cada línea de base mide la correlación cruzada entre las señales  $b_1(t)$  y  $b_2(t)$  captadas por cada par de antenas que forman la agrupación dispersa (Figuras 5 y 6).



**Figura 7.** Esquema básico de una línea de base en un radiómetro interferométrico.

En el caso ideal, antenas y receptores idénticos y ancho de banda relativo despreciable, suponiendo que las antenas de la agrupación están situadas sobre el plano XY en las posiciones  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$ , cada correlación cruzada es una muestra de la llamada función de visibilidad  $V(u, v)$  (unidades: Kelvin) [6,7]

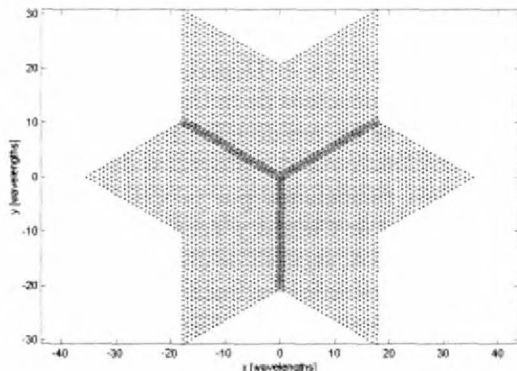
$$V_{1,2}(u_{1,2}, v_{1,2}) = \frac{1}{k_B B G} \frac{1}{2} \langle b_1(t) b_2^*(t) \rangle = \frac{1}{\Omega} F \left[ \frac{T_B(\xi, \eta)}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} |F_n(\xi, \eta)|^2 \right], \quad (2)$$

donde  $(u_{1,2}, v_{1,2}) = (x_2 - x_1, y_2 - y_1)/\lambda$  es el espaciado entre antenas normalizado a la longitud de onda,  $(\xi, \eta) = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi)$  son los cosenos directores respecto de los ejes X e Y, y F representa la transformada de Fourier entre los dominios  $(\xi, \eta)$  y  $(u, v)$ .  $T_B(\xi, \eta)$  es la temperatura de brillo (Kelvin),  $|F_n(\xi, \eta)|^2$  es el diagrama de radiación normalizado de las antenas (sin unidades, y supuesto igual para todas),  $k_B$  es la constante de Boltzman,  $\Omega$  es el ángulo sólido de antena, G es la ganancia en potencia de cada cadena receptor y B es el ancho de banda de ruido.

Como la temperatura de brillo es una función en dos dimensiones limitada al círculo unidad ( $\xi^2 + \eta^2 = \sin^2 \theta \leq 1$ ), su transformada de Fourier (función de visibilidad) es muestreada de manera óptima sobre una malla hexagonal en el plano  $(u, v)$ . La gran ventaja de los



sistemas interferométricos sobre los de apertura real reside en su mayor resolución angular. En concreto, se puede demostrar que ésta es la misma que la de un phased array con una antena situada en cada punto (u,v). La Figura 8 muestra los puntos de muestreo correspondientes a una agrupación en Y con 23 antenas por brazo.



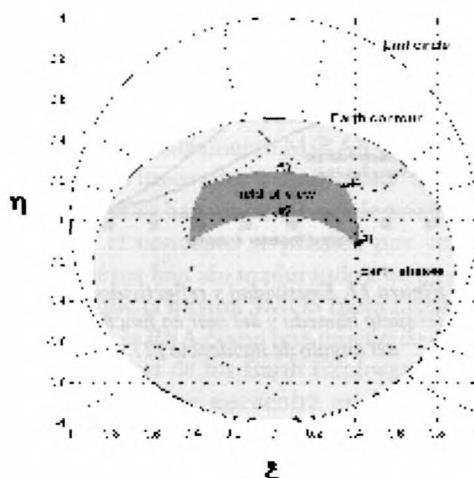
**Figura 8.** Cobertura de frecuencias espaciales (u,v) asociadas a una agrupación en Y con 23 antenas por brazo separadas  $d=0.89$  longitudes de onda.

Respecto el muestreo rectangular, el muestro hexagonal permite una reducción del 13.4 % de las muestras de visibilidad y del hardware asociado [8,9]. El único problema es que debido a limitaciones tecnológicas (tamaño de las antenas y acoplamientos mutuos entre ellas) la mínima línea de base no se puede hacer igual a longitudes de onda (criterio de Nyquist para muestreo hexagonal, en vez de 1/2 para muestreo rectangular). En este caso, tendremos aliasing y el campo de visión (FOV, Field Of View) estará limitado por la repetición periódica del círculo unidad centrado en  $(1/(3d), 1/d)$ ,  $(1/(3d), -1/d)$ ,  $(-1/(3d), 1/d)$ ,  $(-1/(3d), -1/d)$ ,  $(2/(3d), 0)$ , y  $(-2/(3d), 0)$ . Sin embargo, como una gran parte del círculo unidad está ocupada por el cielo, con una temperatura de brillo conocida y mucho menor que la temperatura de brillo de la tierra, se pueden aplicar algunas técnicas de pre-procesado [9] a fin de ensanchar el FOV libre de alias hasta la frontera Tierra-cielo (Figura 9).

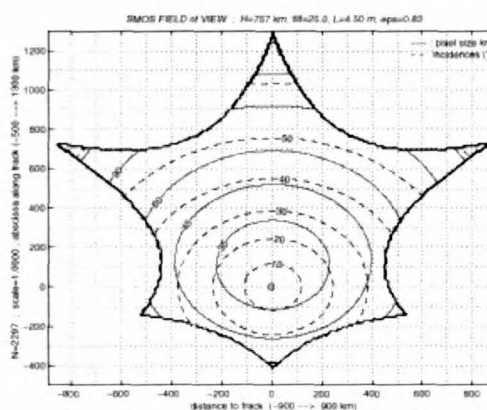
Finalmente, la Figura 10 presenta el FOV libre de alias tal y como aparece sobre la superficie de la Tierra [1]. Las Figuras 9 y 10 son parecidas, pero como la agrupación está inclinada hacia delante, el FOV parece ensanchado en la parte superior, y encogido en la parte inferior.

Se presentan tres familias de curvas: ángulo de incidencia constante (i), ángulo respecto de la dirección perpendicular al plano de la agrupación ( $\theta_a$ ), y resolución espacial ( $\Delta s$ ). Estas tres familias son distin-

tas ya que el plano de la agrupación está inclinado, esto es  $\beta \neq 0$ .

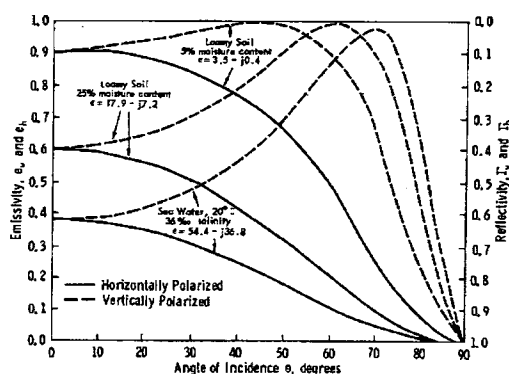


**Figura 9.** Contorno de la Tierra (línea continua) y alias de la Tierra (líneas discontinuas) limitando el FOV libre de alias para un instrumento como MIRAS, en la siguiente configuración altura = 639Km, cabeceo  $\beta=34^\circ$ , y separación entre antenas  $d=0.89 \lambda$ . En esta configuración la anchura del FOV libre de alias es de 725 Km para ángulos de incidencia sobre la tierra entre  $40^\circ$  y  $55^\circ$ .



**Figura 10.** FOV de una configuración de SMOS. El eje y es paralelo a la dirección de avance del satélite [1]

A la hora de evaluar las prestaciones de la misión SMOS la resolución espacial juega una especial relevancia. El ángulo  $\theta_a$  no sólo influye en la resolución espacial, sino en la sensibilidad radiométrica ya que el digrama de radiación de la antena elemental debe ser tenido en cuenta. Por otra parte, la temperatura de brillo emitida por la Tierra depende del ángulo de incidencia para cada polarización.



**Figura 11.** Emisividad y reflectividad del suelo húmedo y del mar en función del ángulo de incidencia [2]

Como se comentó anteriormente, en cada periodo de medida se obtiene un mapa completo bidimensional de temperaturas de brillo,  $T_B$ . A medida que el satélite avanza, cada píxel sobre la Tierra se ve varias veces, con ángulos de incidencia variables. Esto es, cada píxel se mueve de arriba a abajo a lo largo de un segmento vertical en la Figura 10. A medida que avanza, el ángulo de incidencia, el tamaño del píxel, y el ángulo respecto de la normal al array varían.

*MIMOSA es un proyecto a tres años actualmente en proceso de evaluación*

En términos de recuperación de la humedad de suelo este hecho es de considerable interés [5]. En primer lugar, proporciona un número mayor de muestras independientes; y en segundo lugar, permite mejorar la discriminación entre parámetros de la superficie desconocidos (espesor óptico de la vegetación, etc.), ya que introducen distintas variaciones en  $T_B$  con el ángulo de incidencia.

*WISE es un proyecto a un año financiado por la ESA que prevé una campaña de medidas de un mes de duración en la plataforma petrolífera Casablanca de Repsol, en las costas de Tarragona*

En términos de recuperación de la salinidad del mar también se espera que la información multivista

sea importante a la hora de descartar píxeles contaminados con radiación proveniente del Sol a través de reflexiones en la superficie de la mar, y a la hora de tener en cuenta la variación azimutal de la emisividad del mar debida a la rugosidad introducida por el viento.

#### 4. LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA Y EL PROYECTO MIRAS

Desde 1993, en el Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions de la Universitat Politècnica de Catalunya se ha venido trabajando en el proyecto MIRAS en el marco de dos proyectos de investigación de tres años financiados por la CICYT (Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología) y ocho convenios con la ESA, algunos de ellos como consultores de MIER Comunicaciones, encargada de la construcción de los receptores, y CASA, encargada de las antenas, estructura mecánica etc. y contratista principal del llamado Proyecto Piloto del Demostrador de MIRAS. La mayor parte del trabajo realizado se ha centrado en el estudio del instrumento en sí mismo desde el punto de vista de ingeniería: análisis de errores, técnicas de calibración e inversión, etc.

*La radiometría por síntesis de apertura bidimensional ofrece una oportunidad única para obtener dos variables geofísicas de vital importancia en el estudio del clima y su variación, como son: la humedad del terreno y la salinidad del mar*

En la actualidad, las dos grandes líneas de actividad se centran en los proyectos WISE - MIMOSA y el desarrollo del simulador de MIRAS.

**Los proyectos WISE y MIMOSA-** Estos dos proyectos pretenden estudiar los efectos de la salinidad, del viento (intensidad y dirección del oleaje y espuma) y de la temperatura superficial del mar en la temperatura de brillo del mar en banda L, para diferentes ángulos de incidencia y de azimut. Se pretende con ello tener modelos fiables para ser incluidos en los algoritmos de recuperación de salinidad que se aplicarán a los datos generados por la misión SMOS.

WISE es un proyecto a un año financiado por la ESA que prevé una campaña de medidas de un mes de

duración en la plataforma petrolífera Casablanca de Repsol, en las costas de Tarragona (Figura 12). Además de UPC, cuenta con la participación del Institut de Ciències del Mar y LODYC (Francia). Sus objetivos se focalizan básicamente en el modelado de los llamados parámetros de Stokes en banda L. Los parámetros de Stokes son las temperaturas de brillo en poalrización vertical y horizontal, y las partes real e imaginaria de la correlación cruzada de los campos en polarizaciones vertical y horizontal.

MIMOSA es un proyecto a tres años actualmente en proceso de evaluación. Sus objetivos son más ambiciosos y, caso de ser aprobado, incluirán una campaña de medidas de 4 meses de duración en la misma plataforma, con vuelos simultáneos de otros radiómetros en banda L etc. Su objetivo último es ya el desarrollo de los algoritmos que, partiendo de los datos de SMOS, lleguen a la recuperación de la SS. Además, se estudiará el impacto de la salinidad, su variación con la profundidad etc. en los modelos de circulación oceánica y de interacción océano-atmósfera.



**Figura 12.** La plataforma petrolífera Casablanca de Repsol en las costas de Tarragona.

**El Simulador de SMOS.** El simulador de SMOS pretende optimizar y completar un programa ya existente que permite estudiar el comportamiento del instrumento: desde la generación de la órbita de la plataforma hasta el análisis de errores en las temperaturas de brillo recuperadas, pasando por un generador de escenas de temperatura de brillo a partir de parámetros geofísicos, un modelado de los errores instrumentales, técnicas de calibración etc. Este trabajo se llevará a cabo dentro de un proyecto financiado por la CICYT, y probablemente con apoyo de la ESA.

## 5. CONCLUSIONES

La radiometría por síntesis de apertura bidimensional ofrece una oportunidad única para obtener dos variables geofísicas de vital importancia en el estudio del clima y su variación, como son: la humedad del terreno y la salinidad del mar. A pesar de haberse utilizado desde hace varias décadas en radioastronomía, el concepto del instrumento MIRAS para observación de la Tierra es innovador y ambicioso. Gran parte de los desarrollos se han realizado desde principios de los 90, cuando el concepto se planteó por vez primera. Estos progresos han ido madurando esta técnica, hasta el punto de que la misión SMOS fuera factible, y fuera aprobada por la ESA como una misión de oportunidad dentro de la serie de los Earth Explorer. En la actualidad el proyecto se encuentra en fase A, donde se llevará a cabo un análisis detallado de toda misión, y si no hay imprevistos, el lanzamiento está previsto para el año 2005. Este artículo describe las principales motivaciones de dicha misión, los principios básicos de las técnicas de síntesis de apertura en radiometría y las principales contribuciones de la Universitat Politècnica de Catalunya a dicho proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] Kerr et al., 1998, MIRAS on RAMSES: radiometry applied to soil moisture and salinity measurements, Full proposal, A.O. Earth Explorer Opportunity Missions, ESA, 1998. SMOS web site: <http://www-sv.cict.fr/cesbio/smos>
- [2] Ulaby et al., Microwave Remote Sensing, Vol I, ed. Artech House, Boston MA, 1981
- [3] <http://www.vims.edu/facilities/BeaverSLFMR.htm>, <http://www.quad-eng.com/terra/lb/lb.html>
- [4] <http://maximus.ce.washington.edu/~tempcm/Post2002/smm3.html>
- [5] Wigneron, J.P., P. Waldteufel, A. Chanzy, J. C. Calvet, O. Marloie, Hanocq, and Y. Kerr, «Retrieval capabilities of L-Band 2-D interferometric radiometry over land surfaces (SMOS Mission)», 6th Specialist Meeting on Microwaves Radiometry, VSP, Zeist, The Netherlands, in press, 1999.
- [6] Thompson, A. R., J. M. Moran, and G. W. Swenson, Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, John Wiley and Sons, 1986.
- [7] Ruf, C. S., C. T. Swift, A. B. Tanner, D. M. LeVine, «Interferometric Synthetic Aperture Radiometry for the Remote Sensing of the Earth», IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 26, N° 5, pp 597-611, September 1988.
- [8] Mersereau, R. M., «The Processing of Hexagonally Sampled Signals», Proceedings of the IEEE, Vol 67, N° 6, pp 930-949, June 1979.
- [9] Camps, A., «Application of Interferometric Radiometry to Earth Observation», Tesis Doctoral, 1996, Universitat Politècnica de Catalunya.